网络出版时间:2025-08-07 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.02.017

温度与水势对扁茎黄芪种子萌发的影响

罗清清,董欢,曹蔚,郭康雅,郭媛,段琦梅

(西北农林科技大学 化学与药学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】探讨温度和水势对扁茎黄芪种子萌发的影响,明确温度、水势与种子萌发之间的关系,为扁茎黄芪规范化栽培提供理论依据。【方法】以陕西省大荔县扁茎黄芪种子为材料,在不同温度(5,10,15,20,25,35 ℃)和水势(0,−0.2,−0.4,−0.6,−0.8 MPa)下进行萌发试验,利用多元回归方法建立积温模型与水势模型,分析温度和水势对扁茎黄芪种子萌发的影响。【结果】在 20 ℃时,扁茎黄芪种子萌发率达最大(94.00%),萌发速率略低于 25 ℃,但二者无显著差异;在 0 MPa 时,种子萌发率达最大(92.74%),萌发率和萌发速率均随水势减小而降低。种子萌发的基础温度 T_b 为 7.97 ℃,种子累计萌发率达 50%时的积温 $\theta_{T(50)}$ 为 358.88 ℃ · h;种子萌发的基础水势 $\psi_{b(50)}$ 为 −0.655 8 MPa,种子累计萌发率达 50%时的水势积累值 $\theta_{H(50)}$ 为 20.15 MPa · h。【结论】温度和水势对扁茎黄芪种子萌发有不同程度影响,其萌发的最适温度与水势分别为 20 ℃与 0 MPa,可根据种子温度和水势需求规律预测萌发时间来安排生产,提升扁茎黄芪栽培规范化水平。

[关键词] 扁茎黄芪;种子萌发;积温模型;水势模型;中药材栽培

[中图分类号] S567.23;Q945.34 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)02-0162-08

Effects of temperature and water potential on seed germination of *Astragalus complanatus*

LUO Qingqing, DONG Huan, CAO Wei, GUO Kangya, GUO Yuan, DUAN Qimei

(*College of Chemistry and Pharmacy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: 【Objective】 This study aims to investigate the effects of temperature and water potential on seed germination of *Astragalus complanatus*, in order to provide a theoretical basis and technical guidance for the standardized cultivation of *A. complanatus*. 【Method】 *A. complanatus* seeds from Dali County, Shaanxi Province were used as materials, and seed germination was tested under different temperatures (5, 10, 15, 20, 25, and 35 ℃) and different water potentials (0, −0.2, −0.4, −0.6, and −0.8 MPa). Multiple regression analysis was used to establish the thermal model and water potential model, which were used to evaluate the effects of temperature and water potential on seed germination of *A. complanatus*. 【Result】 At 20 ℃, the germination rate reached the maximum (94.00%) and the germination speed was slightly lower than that at 25 ℃, but there was no significant difference. The germination rate reached a maximum of 92.74% at 0 MPa, and both germination rate and germination speed were decreased with the decrease of water potential. The basal temperature for seed germination was 7.97 ℃, and the accumulated temperature $\theta_{T(50)}$ was 358.88 ℃ · h when the seed germination rate reached 50%. The basic water potential for seed

[收稿日期] 2024-05-09 [修回日期] 2024-08-01

[基金项目] 陕西省重点研发计划项目(2021SF-384);西北农林科技大学科技创新专项(2452021090);杨陵区区校一体开展农村人才振兴项目(TG20220068);西北农林科技大学校企合作项目(TG20221121)

[作者简介] 罗清清(2000−),女,湖北荆州人,在读硕士,主要从事中药材规范化生产和质量评价研究。E-mail:coriolus_luo@163.com

[通信作者] 段琦梅(1969−),女,陕西杨凌人,副教授,博士生导师,主要从事中药材规范化生产和质量评价研究。E-mail:duanqimei1969@163.com

germination was －0.655 8 MPa, and the water potential accumulation value $\theta_{H(50)}$ was 20.15 MPa・h when the seed germination rate reached 50%.【Conclusion】The seed germination of *A. complanatus* was affected by temperature and water potential, and the optimal temperature and water potential were 20 ℃ and 0 MPa, respectively. Based on the requirement of temperature and water potential of *A. complanatus*, the seed germination time could be predicted and its production could be arranged to improve the standardization level of its cultivation.

Key words: *Astragalus complanatus* R. Br.; seed germination; thermal model; water potential model; cultivation of Chinese medicinal herbs

沙苑子为豆科植物扁茎黄芪(*Astragalus complanatus* R. Br.)的干燥成熟种子，始记载于《神农本草经》，药用历史悠久，是临床常用中药材之一。沙苑子具有丰富的药用及营养价值[1]，早在唐代民间便有以沙苑子代茶饮的习俗。随着社会发展，其价值愈来愈受到人们的广泛重视。研究发现，沙苑子内含丰富的生化成分，如氨基酸、多肽、蛋白质、黄酮类化合物[2]、三萜类化合物、有机酸、鞣质、甾体化合物、生物碱等以及铁、锌、锰、铜等必需微量元素[3-4]。药理学研究显示，沙苑子具备多方位的药理作用[5-6]，能发挥保护肝脏、降血脂[7]、降血压、抑制血小板聚集、抗炎[8]以及增强机体免疫功能等。因沙苑子功能广泛且疗效显著，更兼具开发运动补剂等保健品及营养药膳的巨大潜力[9-10]，近年来沙苑子市场需求量逐年增长，质量要求也越来越高。但野生扁茎黄芪资源已远远不能满足人们的需求，早在 19 世纪 60 年代，扁茎黄芪就逐渐由野生转为家种。为了确保临床用药，满足国内外市场的需求，人工栽培扁茎黄芪成为解决供需矛盾的主要措施。

药用植物的生命周期中，种子萌发阶段占据着举足轻重的地位，不仅是生长早期的关键环节，更是一个涉及多方面调控的生理活动，受温度、光照、水势等外界环境因素的影响[11-12]，其中温度和水势对种子萌发起主导作用[13]。提高种子萌发的可控性和科学性是中药材规范化栽培的关键环节[14]。近年来，国内外对于扁茎黄芪种子的研究主要集中在化学成分提取与分离及其药理活性等方面，在扁茎黄芪规范化栽培方面的研究较少。目前，中国尚未对扁茎黄芪种子制定出统一的国家及地方标准，对其研究较为薄弱，而且对影响种子萌发的因素及这些因素与环境关系的量化研究相对较少。扁茎黄芪主要依赖种子进行有性繁殖，在人工栽培扁茎黄芪的过程中，种子发芽率难以保证已成为扁茎黄芪种植的制约因素。因此，对种子萌发特性的研究在扁茎黄芪规范化栽培生产中具有重要的意义。本试验重点考察了温度与水势 2 个关键因素对扁茎黄芪种子萌发过程的影响，并对其积温需求以及水势时间积累值进行了量化研究，以期在实际生产中提高种子的发芽率，为扁茎黄芪的规范化栽培提供科学、合理的参考依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

选取实际生产中应用较多的陕西省大荔县赵渡镇扁茎黄芪种子进行萌发试验，种子呈带小凹陷的扁圆形，状如满月，棕褐色，平滑有光泽，直径约为 2 mm。经西北农林科技大学生命科学学院张跃进教授鉴定为豆科植物扁茎黄芪的干燥成熟种子。

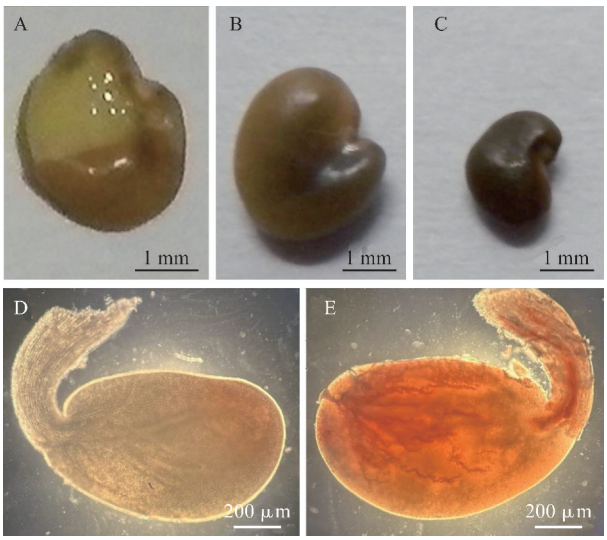
1.2　种子的基本特性及测定方法

1.2.1　*种子含水量及千粒质量*　参照 GB/T 41221－2021《中药材种子检验规程》采用低温((103±2) ℃)烘干法测定扁茎黄芪种子含水量((烘干前样品质量－烘干后样品质量)/烘干前样品质量×100%)。参照 GB/T 41221－2021《中药材种子检验规程》中的“百粒法”测定扁茎黄芪种子千粒质量，将经过净度分析后的种子采用“四分法”随机取样 8 份(每份 100 粒)，用 1/10 000 电子天平称其质量，依据平均值计算种子千粒质量。结果得出试验所用扁茎黄芪种子含水量为(9.87±0.34)%，千粒质量为(3.05±0.18) g。

1.2.2　*种子硬实率*　随机选取净选后的种子 50 粒，置于培养皿中，加入蒸馏水，室温下浸泡 24 h，取出对种子数目进行统计，将膨胀和膨胀破皮种子归为非硬实种子，未明显膨胀且质地坚硬的种子归为硬实类别(图 1-A－C)，并计算种子硬实率(硬实种子数/供试种子总数×100%)。每批样品重复测定 3 次，取平均值。结果表明，试验所用扁茎黄芪种子硬实率为(4.67±0.18)%。

1.2.3　*种子生活力*　采用 TTC 染色法[15]测定扁茎黄芪种子生活力，具体方法为：选取种子共 5 份，每份 50 粒，用蒸馏水清洗后，浸泡 8 h 以完全吸水膨胀。待种子准备就绪后，执行切刺处理。随后，将

种子置于体积分数 0.5% TTC 溶液中,在常温暗处染色 12 h,种子以胚的主要结构和营养组织(即胚乳)明显着色呈鲜红色且组织状况良好为活力种子,未染色的为无活力种子(图 1-D—E)。结果显示,试验所用扁茎黄芪种子生活力为(87.89±4.55)%。



A. 膨胀破皮种子;B. 膨胀种子;C. 未明显膨胀种子;
D. 种子胚与胚乳未染色形态;E. 种子胚与胚乳均染色形态。
A. Expanded and broken-skinned seeds; B. Expanded seeds;
C. No obvious swelling seeds; D. Seed embryos and endosperm were not stained; E. Seed embryo and endosperm were stained.

图 1 扁茎黄芪硬实种子和活力种子

Fig. 1 Hardness seed and vigor seed of *Astragalus complanatus*

1.3 种子萌发率

种子萌发试验包括不同温度和不同水势处理两部分。温度试验设置 5,10,15,20,25,35 ℃ 6 个梯度,加入蒸馏水后进行萌发;水势试验在 20 ℃环境中采用 PEG-6000 分别配制 0,—0.2,—0.4,—0.6,—0.8 MPa 5 个梯度,对应的 PEG-6000 质量浓度分别为 0,0.119,0.178,0.223,0.262 g/mL。

选取经净选后的扁茎黄芪种子 50 粒,用体积分数 75%酒精溶液灭菌处理 30 s,随后以蒸馏水冲洗并用滤纸擦拭至干燥。将经过预处理的种子置于铺设 2 层滤纸的直径 9 cm 培养皿中,加入 5 mL 蒸馏水(温度试验)或者 5 mL PEG-6000 溶液(水势试验),密闭培养皿后,按照设置温度(温度试验)或者 20 ℃(水势试验)置于恒温培养箱中进行种子发芽试验。试验过程中,自种子开始吸水起,每隔 4~12 h 观察 1 次,记录发芽数量。将胚根突破种皮长至 2 mm 以上或胚根明显可见者视为发芽。每批种子重复 5 次。最后计算种子累计萌发率(种子累计萌发数/供试种子数×100%)和种子调整累计萌发率(种子累计萌发率/种子生活力)。

1.4 积温模型建立

在相同的水势条件下,$\theta_{T(n)}$ 可用以量化种子批次达到累计萌发率 n 时所需的积温值,即:

$$\theta_{T(n)}=(T-T_b)t_n。\quad(1)$$

式中:T 为环境温度;T_b 为种子萌发的基础温度;t_n 为种子累计萌发率达到 n 时所用时间。

通过调整后的种子累计萌发率绘制发芽时间过程曲线,利用 Sigmaplot 14.0 软件中 chapman-3 参数方程 $y=a(1-e^{-bx})^c$ 进行曲线拟合,其中 y 表示种子调整累计萌发率;x 表示种子发芽时间;a 表示种子最大调整累计萌发率;b 表示萌发曲线的形状;c 表示萌发速率,数值越小代表萌发速率越快[16]。根据模型方程计算种子在不同温度条件下达到累计萌发率 n 时对应的理论时间 t_n。

以 $1/t_n$(种子萌发速率)为纵坐标,实际萌发温度为横坐标绘图,建立种子萌发速率与萌发温度的线性回归拟合,并向外推相交 X 轴于一点确定种子萌发的基础温度(T_b)。种子达到累计萌发率 n 时所需的积温值[$\theta_{T(n)}$]由回归直线斜率的倒数决定[17]。$\theta_{T(n)}$ 在自然条件下呈正态分布,具有明确的均值和标准差。利用 Excel 软件进行回归分析,计算种子累计萌发率达平均值(50%)时所需的积温值[$\theta_{T(50)}$]及其标准差(σ_{θ_T})。

1.5 水势模型建立

当种子吸水后其水势达到某个阈值,种子才能萌发,这个阈值被称为基础水势 ψ_b[18]。在特定温度条件下,一定数量的种子要达到累计萌发率(n)时所需的水势积累值为 $\theta_{H(n)}$,即:

$$\theta_{H(n)}=(\psi-\psi_{b(n)})t_n。\quad(2)$$

式中:$\psi_{b(n)}$ 为种子累计萌发率达到 n 所需的基础水势;ψ 为外界环境水势;t_n 为种子累计萌发率达到 n 时所用时间。

2 结果与分析

2.1 温度和水势对扁茎黄芪种子萌发的影响

2.1.1 温 度 扁茎黄芪种子在不同温度下萌发试验结果(图 2)显示,各温度处理下扁茎黄芪种子的调整累计发芽率随萌发时间推移先逐步提高,之后趋于稳定。其中,在试验设置的温度条件下,20 ℃处理种子累计萌发率可达到最大(94.00%);当环境温度超过 20 ℃时,扁茎黄芪种子的调整累计萌发率均表现出不同程度下降,说明高温环境显著抑制了种子萌发,如在 35 ℃条件下,扁茎黄芪种子的最

大调整累计萌发率只有 28.40%，远远小于其他温度处理。同时，在试验中观察到，高温条件下种子极易出现大规模的腐烂现象，这也严重影响了种子的萌发率。另外，在 5 ℃环境条件下，扁茎黄芪种子在试验前期没有萌发，但随萌发时间延长最大累计萌发率可达 88.40%，与 20 ℃处理差异不明显。

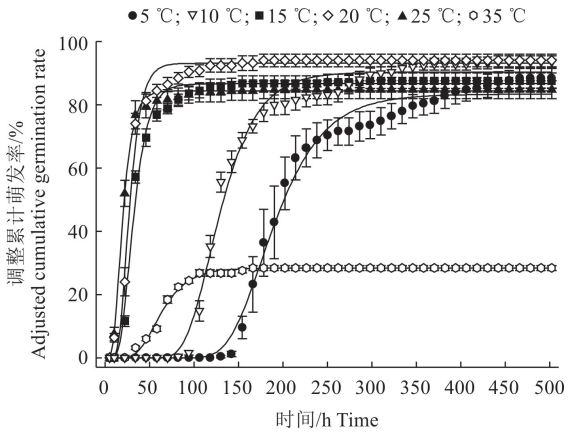


图 2　不同温度条件下扁茎黄芪种子调整累计萌发率的变化（$n=5$）

Fig. 2　Adjusted cumulative germination rate of *Astragalus complanatus* seeds under different temperature conditions ($n=5$)

用 chapman-3 方程拟合各温度处理扁茎黄芪种子萌发的拟合方程，结果如表 1 所示。

表 1　不同温度条件下扁茎黄芪种子萌发曲线拟合方程

Table 1　Germination curve equation of *Astragalus complanatus* seeds under different temperature conditions

温度/℃ Temperature	方程 Equation	决定系数(R^2) Coefficient of determination
5	$y=83.373\,7(1-e^{-0.026\,3x})^{101.375\,5}$	0.936 7
10	$y=90.328\,8(1-e^{-0.034\,9x})^{61.047\,6}$	0.976 8
15	$y=86.654\,2(1-e^{-0.087\,8x})^{10.615\,1}$	0.946 1
20	$y=93.129\,5(1-e^{-0.109\,5x})^{13.092\,5}$	0.950 3
25	$y=84.403\,5(1-e^{-0.120\,5x})^{6.654\,5}$	0.895 7
35	$y=28.362\,7(1-e^{-0.047\,9x})^{13.868\,0}$	0.967 1

注：y 为种子调整累计萌发率，x 为种子发芽时间。下表同。

Note: y is the seed adjusted cumulative germination zate, x is the seed germination time. The same below.

表 1 表明，不同温度处理扁茎黄芪种子萌发曲线拟合方程的决定系数(R^2)均大于 0.850 0，说明拟合方程能较好地反映种子萌发率的变化规律，拟合结果可靠。在拟合方程 $y=a(1-e^{-bx})^c$ 中，a 表示种子最大调整累计萌发率，在 20 ℃时其理论值最大(93.129 5%)，与实际测定值(94.00%)高度相符。综合图 2 和表 1 可知，在 15，20，25 ℃条件下，扁茎黄芪种子调整累计萌发率达到最大的时间差异不明显，均在 3 d 以内，并以 25 ℃处理时间最短，20 ℃处理次之；与 20 ℃处理相比，低温处理(5，10 ℃)对种子最大调整累计萌发率影响较小，其理论值分别为 83.373 7%和 90.328 8%，但低温抑制种子贮存物质的降解与转化，使其达到最大萌发率的时间大大延长。

2.1.2　水　势　扁茎黄芪种子在不同水势处理下萌发试验结果(图 3)显示，在本试验所设置的水势区间内，种子调整累计萌发率随水势降低呈现出递减趋势，其中 0，−0.2，−0.4 MPa 处理明显较高，−0.6 MPa 处理居中，−0.8 MPa 处理最低。随处理水势降低，扁茎黄芪种子萌发过程达到最大调整累计萌发率所需时间依次延长，即过低水势明显减缓种子的萌发速率。

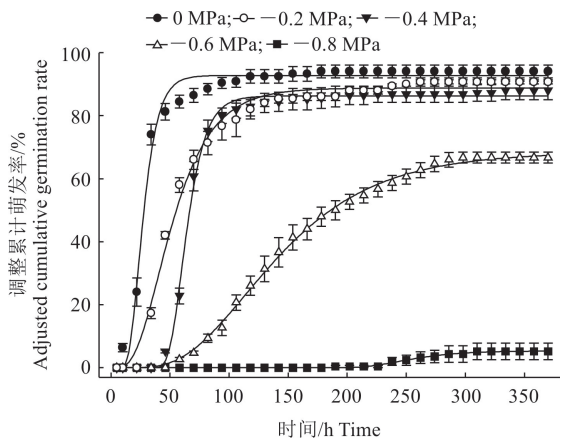


图 3　20 ℃时不同水势条件下扁茎黄芪种子调整累计萌发率的变化（$n=5$）

Fig. 3　Adjusted cumulative germination rate of *Astragalus complanatus* seeds under different water potentials at 20 ℃ ($n=5$)

用 chapman-3 方程拟合不同水势条件下扁茎黄芪种子萌发过程，结果如表 2 所示。

表 2　20 ℃时不同水势条件下扁茎黄芪种子萌发曲线方程

Table 2　Germination curve equation of *Astragalus complanatus* seeds under different water potentials at 20 ℃

水势/MPa Water potential	方程 Equation	决定系数(R^2) Coefficient of determination
0	$y=92.741\,7(1-e^{-0.113\,5x})^{14.494\,3}$	0.956 8
−0.2	$y=88.751\,5(1-e^{-0.039\,8x})^{4.904\,2}$	0.983 8
−0.4	$y=86.221\,0(1-e^{-0.091\,4x})^{242.628\,1}$	0.968 7
−0.6	$y=68.389\,5(1-e^{-0.016\,4x})^{6.434\,5}$	0.982 0
−0.8	$y=5.383\,1(1-e^{-0.034\,9x})^{4\,847.150\,7}$	0.348 8

表 2 中，在 0，−0.2，−0.4，−0.6 MPa 条件

下,扁茎黄芪种子萌发拟合方程的 R^2 均大于 0.950 0,说明拟合方程较好地反映了种子萌发率的变化规律,拟合结果可靠,例如,0 MPa 处理时种子实际萌发率为 94.00%,拟合方程所得结果为 92.741 7%。由于−0.8 MPa 条件下种子累计萌发率较低且拟合效果不佳,R^2 仅为 0.348 8,在后续的计算过程中将排除该方程的结果。

2.2 扁茎黄芪种子萌发的基础温度和基础水势

2.2.1 基础温度

通过对扁茎黄芪种子的调整累计萌发率模型数据进行多元回归分析,得到其萌发速率与温度之间的关系如图 4 所示。萌发基础温度 T_b 是种子萌发积温的开始,当环境温度超过种子萌发基础温度时,种子便可积累热量发芽;反之,种子则无法正常萌发。图 4 显示,扁茎黄芪种子萌发的基础温度 T_b 为 7.97 ℃,高于此温度阈值后,种子积聚有效温度并启动萌发过程;随着环境温度升高至 25 ℃,扁茎黄芪种子萌发速率相应提高,这与耿守保等[19]的研究结果一致;之后,当温度超过 25 ℃,种子萌发速率则出现下降趋势。

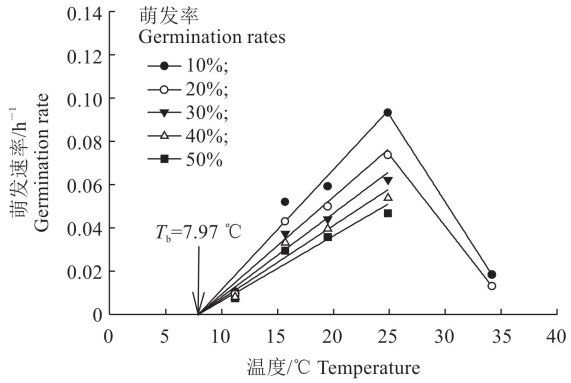


图 4 不同温度条件下扁茎黄芪种子不同萌发率组的萌发速率

Fig. 4 Germination speeds of *Astragalus complanatus* seeds with different germination rates under different temperature conditions

2.2.2 基础水势

种子萌发所需的基础水势值 $\psi_{b(n)}$ 反映了一定比例种子开始发芽所需的最小水势。在种群中 $\psi_{b(n)}$ 遵循正态分布规律,并且可通过种子群体累计萌发率达到 50%时的均值 $\psi_{b(50)}$ 及其对应的标准差表示[18]。图 5 为不同水势条件下扁茎黄芪种子累计萌发率达到 50%时萌发速率的变化情况。图 5 表明种子萌发速率($1/t_{50}$)随着水势升高而升高,萌发速率与水势之间呈显著线性相关,其基础水势 $\psi_{b(50)}$ 为 −0.655 8 MPa。

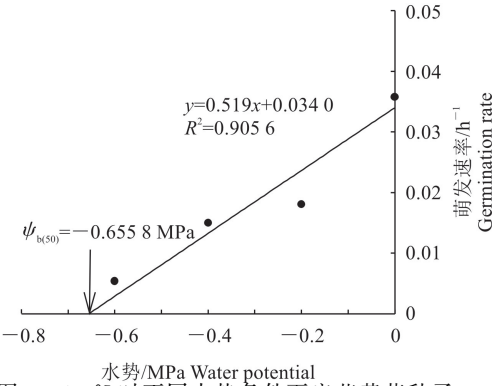


图 5 20 ℃时不同水势条件下扁茎黄芪种子累计萌发率达到 50%的萌发速率

Fig. 5 The cumulative germination rates of *Astragalus complanatus* seeds reached 50% at 20 ℃ with different water potentials

2.3 扁茎黄芪种子萌发的积温值和水势积累值

由图 6 可知,在某一特定温度区间内,扁茎黄芪种子调整累计萌发率随积温的增加而升高。

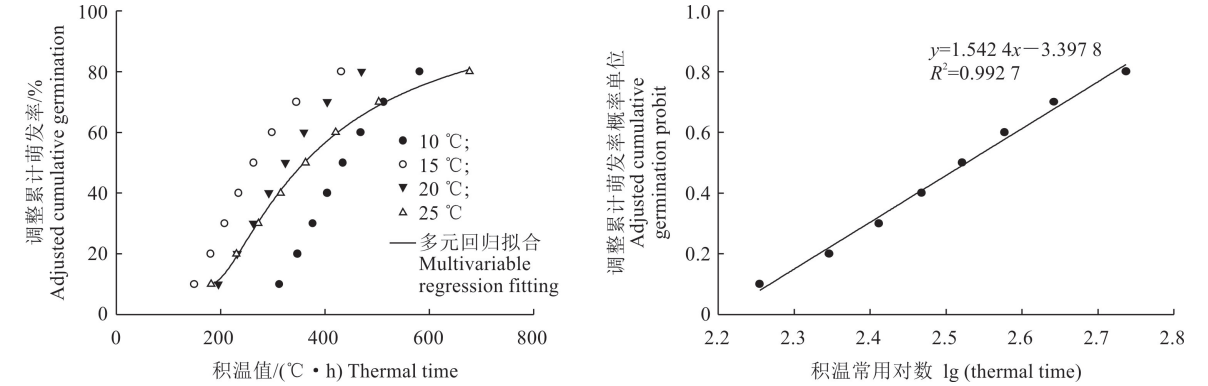


图 6 扁茎黄芪种子萌发的积温模型

Fig. 6 Thermal model of seed germination of *Astragalus complanatus*

利用多元回归分析,将积温值取常用对数可得到种子累计萌发率达到 50%时所需的积温值 $\theta_{T(50)}$ 为 358.88 ℃ · h,标准差 σ_{θ_T} 为 174.18。同理,利用多元回归分析建立种子萌发的水势模型,计算得到

扁茎黄芪种子累计萌发率达到 50％时所需的水势积累值 $\theta_{H(50)}$ 为 20.15 MPa·h，标准差 σ_{θ_H} 为 7.95。

3　讨　论

在种子萌发过程中，首先会经历吸胀阶段，当种皮不透水时，种子被称为硬实种子，此现象会使种子呈现休眠状态，对种子萌发具有很大的影响[20]。本试验中扁茎黄芪种子的硬实率为(4.67±0.18)％，硬实率较低，说明硬实现象并非制约种子萌发率的关键因素。

温度作为调控种子萌发过程的核心环境因素之一，对植物种子萌发启动具有决定性作用，温度过低抑制种子的萌发甚至使种子遭受冻害；温度过高会影响种子的活力，引起种子腐烂霉变[21]。本试验结果表明，温度对扁茎黄芪种子萌发具有显著影响。20 ℃时扁茎黄芪种子萌发率可达到最大，为 94.00％；当环境温度下降时，扁茎黄芪种子的萌发速率下降，即低温抑制扁茎黄芪种子的萌发；当环境温度升高达到 25 ℃时，扁茎黄芪种子的萌发速率较高，但萌发率为 84.8％；35 ℃时种子萌发率仅为 28.36％，这可能是由于热抑制效应引起的，高温抑制扁茎黄芪种子萌发[22]。

本研究利用多元回归分析建立扁茎黄芪种子萌发的积温模型，主要用于预测种子萌发的温度阈值以及积温，结果表明，扁茎黄芪种子萌发的基础温度 T_b 为 7.97 ℃，种子累计萌发率达到 50％时的积温值 $\theta_{T(50)}$ 为 358.88 ℃·h，标准差 σ_{θ_T} 为 174.18。据报道，达茂黄芪种子的萌发基础温度为 0.2 ℃，积温值为 1 129.7 ℃·h[23]。对于基础温度及积温值较高的种子来说，种子萌发需要适宜的萌发温度及较长萌发时间，以便其在不利温度条件下正常萌发和生长[24]。温度对不同地理分布和海拔高度的植物种子萌发有不同影响[25]。陕西大荔县的扁茎黄芪生长在海拔较低的渭北平原，种子萌发的基础温度较高，表明其在萌发初始阶段对温度的要求较高，在低温环境下种子萌发受到抑制[26]，这种萌发机制确保了大部分种子在温度较高、雨水较充足的晚春季节萌发，增大了幼苗存活机率。而扁茎黄芪种子的积温需求相对较低，表明在萌发启动之后能较迅速地萌芽，萌发整齐度较高，但这可能会导致其对环境的适应性降低，在栽培过程中风险相对较高。因此，在扁茎黄芪规范化栽培的过程中应采用合理的种子管理技术，如采用覆膜保温的方式可促进扁茎黄芪种子的萌发和生长[27]。

植物种子吸胀需要充足的水分，适度的水势胁迫能够促进种子萌发，但重度的干旱胁迫会对种子的萌发产生抑制作用[28]。本试验用 PEG-6000 模拟水势胁迫，研究其对扁茎黄芪种子萌发的影响。结果表明，低水势抑制了扁茎黄芪种子的萌发，甚至使其几乎不萌发，在水势为－0.8 MPa 时萌发率仅为 5.20％，同时发现低水势可减缓扁茎黄芪种子的萌发速率。根据所建立的水势模型得出，扁茎黄芪种子萌发的基础水势为－0.655 8 MPa，水势积累值 $\theta_{H(50)}$ 为 20.15 MPa·h，与山野豌豆基础水势(－1.3 MPa)和水势积累值 $\theta_{H(50)}$(40.8 MPa·h)相比，扁茎黄芪种子萌发阶段对水势要求较高，该特性不利于在相对干旱的生境中种子水势的积累，进而影响种子播种后迅速萌发的能力[29]。在实际生产中人们普遍认为扁茎黄芪种子耐干旱、适应性强[30]，因此在播种后往往不重视田间管理，浇水较少，但扁茎黄芪种子萌发时较高的基础水势表明其在萌发过程中需要充足的水分来激活种子的生化过程[31]。因此，在人工种植扁茎黄芪时，播种后应当注意保持土壤适度湿润，以促进种子的萌发，提高扁茎黄芪种子的萌发率及出苗整齐度。

综上所述，在实际生产中，可根据实际环境温度与水势情况，利用本试验建立的扁茎黄芪种子积温模型与水势模型定量预测出苗时间，精确指导扁茎黄芪的规范化栽培。

4　结　论

1)在试验设置的温度范围(5～35 ℃)，20 ℃处理扁茎黄芪种子萌发率达到最大(94.00％)，萌发速率略低于 25 ℃处理，但二者无显著差异，种子萌发的最适温度条件为 20 ℃。扁茎黄芪种子萌发的基础温度 T_b 为 7.97 ℃，种子群体萌发率达到 50％时的积温值 $\theta_{T(50)}$ 为 358.88 ℃·h。

2)在试验设置的水势范围(－0.8～0 MPa)，0 MPa 处理扁茎黄芪种子萌发率最大(92.74％)，萌发率与萌发速率均随着水势减小而降低，其种子萌发的最适水势条件为 0 MPa。扁茎黄芪种子萌发的基础水势 $\psi_{b(50)}$ 为－0.655 8 MPa，种子群体萌发率达到 50％时的水势积累值 $\theta_{H(50)}$ 为 20.15 MPa·h。

3)扁茎黄芪种子萌发的基础温度与基础水势均较高，积温值与水势积累值较低，萌芽较快，因此可适当晚播种或者播种后增加保温措施，同时播种后应加强温度与湿度管理，注意观测土壤水分状态，及时补水。

[参考文献]

[1] NG Y F, TANG P C T, SHAM T T, et al. Semen *Astragali complanati*: an ethnopharmacological, phytochemical and pharmacological review[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2014, 155(1): 39-53.

[2] KUO J C L, ZHANG L J, HUANG H T, et al. Bioactive flavonoid glycosides and HPLC and UPLC quantification of commercial *Astragali complanati* Semen[J]. Molecules, 2020, 25(20): 4762.

[3] 许梦莹,郭日新,张晓,等. 沙苑子化学成分研究[J]. 中国中药杂志,2018,43(7):1459-1466.
XU M Y, GUO R X, ZHANG X, et al. Chemical constituents from seeds of *Astragalus complanatus*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2018, 43(7): 1459-1466.

[4] 张清安. 沙苑子中酚类物质研究及其抗氧化成分的 HPLC 筛选[D]. 西安:陕西师范大学,2010.
ZHANG Q A. Study on phenols in *Semen astragali* complanati and screening of antioxidant components by HPLC[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2010.

[5] SHAM T T, ZHANG H, MOK D K W, et al. Chemical analysis of *Astragali complanati* Semen and its hypocholesterolemic effect using serum metabolomics based on gas chromatography-mass spectrometry[J]. Antioxidants, 2017, 6(3): 57.

[6] 刘春宇,顾振纶,韩蓉,等. 沙苑子提取物对小鼠四氯化碳肝损伤的保护作用[J]. 中草药,2002,33(12):1104-1106.
LIU C Y, GU Z L, HAN R, et al. Protective effect of extract in seed of *Astragalus complanatus* on acute hepatic injury induced by carbon tetrachloride in mice[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2002, 33(12): 1104-1106.

[7] 唐潇然,王景霞,付璐,等. 沙苑子总黄酮对肾阳虚高脂血症模型大鼠 ERα 介导的调脂作用机制研究[J]. 中国中药杂志,2018,43(11):2365-2371.
TANG X R, WANG J X, FU L, et al. Effects of total flavonoids in *Astragali complanati* Semen on liver lipid level and ERα expression on liver in hyperlipidemia rats with kidney-yang deficiency pattern[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2018, 43(11): 2365-2371.

[8] WANG X, XU X T, WU P P, et al. Complanatuside alleviates inflammatory cell damage induced by pro-inflammatory cytokines in skin keratinocytes[J]. Frontiers in Chemistry, 2022, 10: 909651.

[9] 杨瑾. 沙苑子的生物学效应及其作为运动补剂的应用前景[J]. 现代中药研究与实践,2015,29(1):84-86.
YANG J. Biological effects of *Astragali complanati* Semen and its application prospect as sports supplement[J]. Research and Practice on Chinese Medicines, 2015, 29(1): 84-86.

[10] FAN X H, ZHANG Q A, YAN Y Y, et al. Physicochemical properties and *in-vitro* antioxidant capacity of *Astragali complanati* Semen wine[J]. CyTA-Journal of Food, 2017, 15(1): 81-90.

[11] 张晓艳,杨忠仁,郝丽珍,等. 温度及盐胁迫对地梢瓜种子萌发及抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报,2017,37(6):1166-1174.
ZHANG X Y, YANG Z R, HAO L Z, et al. Effect of temperature and salt stress on seed germination and antioxidant enzyme activities of *Cynanchum thesioides* (Freyn). K. Schum[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(6): 1166-1174.

[12] 姬海月,胡本祥,杨冰月,等. 芸苔素对铅胁迫下远志种子萌发和幼苗生长生理特征的影响[J]. 西北植物学报,2022,42(12):2093-2102.
JI H Y, HU B X, YANG B Y, et al. Effects of brassinolide on seed germination and seedling growth and physiological characteristics of *Polygala tenuifolia* under lead stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2022, 42(12): 2093-2102.

[13] 耿守保. 秦艽、颠茄与丹参种子萌发的水热需求[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.
GENG S B. Water and heat requirements for seed germination of *Gentiana macrophylla*, *Belladonna* and *Salvia miltiorrhiza*[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2014.

[14] 梁小燕,李依民,高静,等. 外源水杨酸对盐胁迫下大黄种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西北植物学报,2022,42(11):1919-1926.
LIANG X Y, LI Y M, GAO J, et al. Effect of exogenous salicylic acid on germination and seedling growth of rhubarb under salt stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2022, 42(11): 1919-1926.

[15] 杨帆. 防风种子质量鉴别与评价[D]. 长春:吉林农业大学,2022.
YANG F. Quality identification and evaluation of *Saposhnikoviae* seeds [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022.

[16] BRADFORD K J. Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy[J]. Weed Science, 2002, 50(2): 248-260.

[17] TEIMORI H, BALOUCHI H, MORADI A, et al. Quantifying seed germination response of deteriorated *Trigonella foenum-graecum* L. seed to temperatures and water potentials: thermal time, hydrotime and hydrothermal time models[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2021, 20: 100276.

[18] 王娟. 高山草原 4 种野豌豆属种子萌发的水热响应[D]. 兰州:兰州大学,2012.
WANG J. Seed germination of four *Vicia* species grown in alpine grassland responses to temperature and water [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.

[19] 耿守保,魏永胜,梁宗锁. 丹参种子的种皮颜色与萌发的水分和热量需求[J]. 西北农业学报,2014,23(10):163-169.
GENG S B, WEI Y S, LIANG Z S. The color of *Salvia miltiorrhiza* Bunge seed coat and requirements of moisture and heat for germination[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2014, 23(10): 163-169.

[20] 刘佳哲,余小红,陈乃健,等. 濒危植物膝柄木果实特征和种子萌发特性[J]. 种子,2024,43(3):90-95.

LIU J Z，YU X H，CHEN N J，et al. Fruit characters and seed germination characteristics of endangered plant *Bhesa robusta* [J]. Seed，2024，43(3)：90-95.

[21] 姚林君. 凤丹种子发育、休眠与萌发特性研究[D]. 江苏扬州：扬州大学，2020.
YAO L J. Seed development，dormancy and germination characteristic of *Paeonia ostii*[D]. Yangzhou，Jiangsu：Yangzhou University，2020.

[22] 宋顺华，宋松泉，吴萍，等. 白菜种子萌发的热抑制现象及其与细胞壁降解酶的关系[J]. 园艺学报，2014，41(6)：1115-1124.
SONG S H，SONG S Q，WU P，et al. Thermoinhibition of *Brassica rapa* ssp. *chinensis* seed germination in relation to degrading enzymes of cell walls[J]. Acta Horticulturae Sinica，2014，41(6)：1115-1124.

[23] 鲁小名，魏永胜，梁宗锁. 黄芪种子萌发的基础温度与积温需要：一种模型方法[J]. 西北农业学报，2012，21(7)：127-133.
LU X M，WEI Y S，LIANG Z S. Basal temperature and thermaltime requirement for the germination of *Astragalus membranaceus* seeds：a modeling approach[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica，2012，21(7)：127-133.

[24] 王雅馨，杨婷，魏永胜，等. 渭河阶地不同生境反枝苋种子萌发的热量需求研究[J]. 西北农业学报，2020，29(12)：1831-1838.
WANG Y X，YANG T，WEI Y S，et al. Heat requirements of *Amaranthus retroflexus* seed germination in different habitats of Weihe terraceland[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica，2020，29(12)：1831-1838.

[25] 赵晓英，任继周，王彦荣，等. 3 种锦鸡儿种子萌发对温度和水分的响应[J]. 西北植物学报，2005，25(2)：211-217.
ZHAO X Y，REN J Z，WANG Y R，et al. Germination responses to temperature and moisture in seed from three species of *Caragana*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2005，25(2)：211-217.

[26] 童琪，钟雁，李婧，等. 不同温度对迷人杜鹃种子萌发与幼苗生长及生理特性的影响[J]. 西北植物学报，2020，40(3)：471-477.
TONG Q，ZHONG Y，LI J，et al. Seed germination，seedling growth and physiological characteristics of *Rhododendron agastum* under different temperatures[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2020，40(3)：471-477.

[27] 侯晓苹，张重洲. 道地药材沙苑子的推广栽培技术[J]. 现代园艺，2013(10)：31.
HOU X P，ZHANG C Z. Popularization and cultivation techniques of genuine medicinal material *Astragali complanati* Semen[J]. Xiandai Horticulture，2013(10)：31.

[28] 张肖，王瑞清，李志军. 胡杨种子萌发对温光条件和盐旱胁迫的响应特征[J]. 西北植物学报，2015，35(8)：1642-1649.
ZHANG X，WANG R Q，LI Z J. Response of seed germination to temperature and light conditions，and stresses of salt and drought in *Populus euphratica*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2015，35(8)：1642-1649.

[29] 彭亮，杨冰月，张岗，等. 干旱胁迫对远志种子萌发及幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报，2018，38(4)：741-749.
PENG L，YANG B Y，ZHANG G，et al. Seed germination and seedling growth physiological characteristics of *Polygala tenuifolia* Willd. under drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2018，38(4)：741-749.

[30] 赵喜进，赵帅. 干旱地区的理想药材：沙苑子[J]. 北京农业，2002(9)：16.
ZHAO X J，ZHAO S. An ideal medicinal material in arid areas：*Astragali complanati* Semen[J]. Beijing Agriculture，2002(9)：16.

[31] 摆福红，王凯彬，马小红，等. 不同萝卜品种种子萌发期抗旱性综合评价及抗旱指标筛选[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2024，52(8)：70-81，90.
BAI F H，WANG K B，MA X H，et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of different radish varieties at seed germination stage and screening of drought resistance indexes [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2024，52(8)：70-81，90.

（责任编辑：李小平　侯薇）